Bipolaire transistor als vierpool

Bij de spec's van transistoren leest u soms woorden als h11, h21, etc. Dat zijn begrippen die afkomstig zijn uit de vierpool-theorie waarbij een transistor als 'zwart doosje' wordt behandeld.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 31-10-2023

Achtergrond-informatie over het begrip 'vierpool'

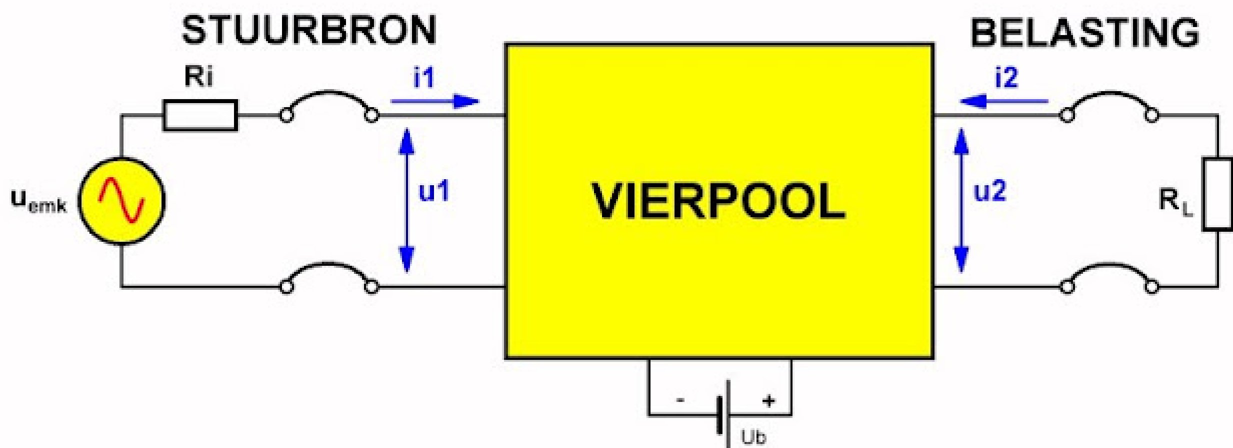
Standaardisering van de transistor parameters
Er bestaat in de theoretische elektronica grote behoefte om de parameters van een transistor (en alle overige onderdelen) op een gestandaardiseerde manier te definiëren. Dat gebeurt met behulp van een wiskundige theorie. Die is nogal ingewikkeld, maar het is toch interessant om daar iets van af te weten. De in deze theorie gestandaardiseerde parameters komt u immers vaak tegen als u de data-bladen van transistoren onder ogen krijgt.

De transistortrap als '*vierpool*'
In de inleiding werd reeds gesteld dat een transistortrap hierbij als een soort van '*zwart doosje*' wordt voorgesteld, met in- en uitgangsgrootheden. Een dergelijke benadering van het verschijnsel transistortrap kan wiskundig worden uitgewerkt. Men spreekt dan van een transistortrap als '*vierpool*'. Een blokje dat gestuurd wordt uit een ingangsgenerator met spanningsbron en inwendige weerstand en belast wordt met een belastingsweerstand. De vierpool-theorie heeft nogal diepzinnige wiskundige achtergronden en het is niet de bedoeling hier erg diep op in te gaan. Wat u in ieder geval moet weten is dat de gegevens die uit de karakteristieken van een transistor kunnen worden afgeleid, zoals dynamische weerstanden, versterkingen, etc, in de vierpool-voorstelling '*genormaliseerd*' zijn. Dat wil zeggen dat zij aan de algemene theorie worden aangepast en ook als dusdanig worden benoemd. Die gegevens noemt men de '*parameters*' van de transistor-vierpool.

De betekenis van de vierpool-theorie
Het behandelen van elektronische componenten als vierpolen is een wiskundige theorie die niet alleen op scholen wordt gebruikt om studenten mee lastig te vallen! In de praktijk wordt vaak van deze theorie gebruikt gemaakt. Een van de voornaamste toepassingsgebieden is het ontwerpen van schakelingen met de computer. Met '*Spice*' en alle daarvan afgeleide programma's kunt u een schakeling op het scherm tekenen. Nadien kent u aan ieder onderdeel een bepaalde waarde of typenummer toe. Het programma heeft nu voldoende gegevens om de gehele schakeling volledig door te rekenen. Geeft u bijvoorbeeld opdracht om aan de ingang een sinusvormige wisselspanning van 100 mV met een frequentie van 1 kHz aan te leggen, dan zal het programma berekenen hoe deze signaalspanning door de schakeling wordt verwerkt. De computer kan de ingewikkelde berekeningen die daarvoor noodzakelijk zijn alleen maar uitvoeren doordat alle onderdelen van het schema voorgeprogrammeerd zijn als vierpolen.

Voorstelling van de vierpool
In de onderstaande figuur is het algemene vierpool-schema van een transistortrap getekend. De ingang van de vierpool wordt gestuurd met een ingangsstroom i_1 en een ingangsspanning u_1. Deze signalen worden geleverd door een signaalbron die een spanning u_{emk} levert en een

inwendige weerstand R_i heeft. De uitgang van de vierpool levert een spanning u_2 af die in de belastingsweerstand R_L een uitgangsstroom i_2 genereert.
De vier grootheden zijn dynamische grootheden, hetgeen wil zeggen dat zij kleine spanning- en stroomveranderingen ∆ voorstellen. Als u een van de parameters gelijk stelt aan nul, zoals bijvoorbeeld $i_1 = 0$, wil dit niet zeggen dat er geen ingangsstroom vloeit! Men wil hiermee alleen zeggen dat de ingangsstroom constant is en de ∆-waarde van de stroom gelijk is aan nul.



Een transistortrap weergegeven als vierpool. (© 2023 Jos Verstraten)

De parameters van de vierpool
Tussen de vier genoemde grootheden, de in- en uitgangsstromen en -spanningen, kan nu een aantal verbanden worden gelegd. Die verbanden noemt men de '*parameters*' van de vierpool.
Als zo'n verband een spanning deelt door een stroom zal het duidelijk zijn dat het verband een '*weerstand*' omschrijft, uitgedrukt in Ω. Als het verband een stroom deelt door een spanning hebt u te maken met een '*geleidbaarheid*', uitgedrukt in S (van Siemens).
Deelt het verband een spanning door een spanning of een stroom door een stroom, dan geeft dit een verhouding van twee identieke grootheden, hetgeen wijst op een '*versterking*' zonder eenheid.

De hybriden van de vierpool
De parameters van de vierpool zijn dus gemengd, want zij definiëren zowel weerstanden, geleidbaarheden en versterkingen. Vandaar dat men deze parameters '*hybriden*' noemt en men ze voorstelt door de letter h.
Na de 'h' volgen twee cijfers. Deze kunnen 1 of 2 zijn. Het zal duidelijk zijn dat '1' verwijst naar de ingang en '2' verwijst naar de uitgang.
De hybride-parameters zijn dynamische parameters. Zij beschrijven dus de verhouding van kleine spanning- en stroomveranderingen ∆.

De vier hybriden van de transistor vierpool

De ingangsweerstand h11
In de vierpool-theorie wordt de ingangsweerstand van een transistortrap gedefinieerd als de verhouding tussen de ingangsspanning u_1 en de ingangsstroom i_1, bij een constante uitgangsspanning. U kunt dus u_2 gelijk aan nul stellen (zie hoger).
Dus:
$h11 = u_1 / i_1$ $(u_2 = 0)$
De eenheid van deze parameter is uiteraard de ohm.

De stroomversterking h21

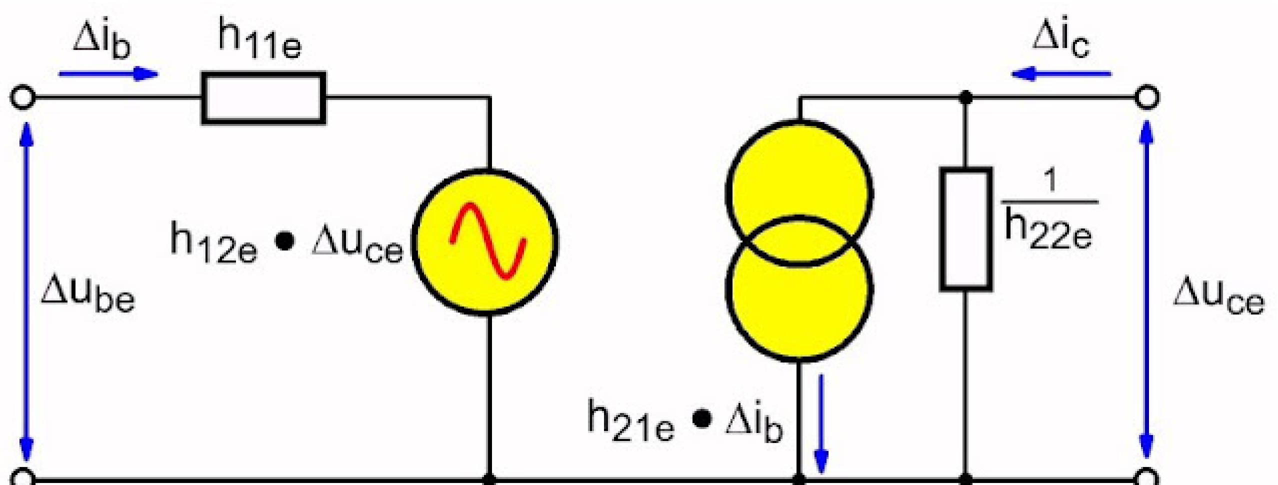
De stroomversterking van de transistortrap is de verhouding tussen de uitgangsstroom i_2 en de ingangsstroom i_1. Men meet deze parameter bij constante uitgangsspanning, dus weer met u_2 gelijk aan nul.
In formulevorm:
$h21 = i_2 / i_1 \; (u_2 = 0)$
Deze hybride-parameter is gelijk aan de waarde van de bekende parameter β. Uiteraard heeft deze verhouding van stroom gedeeld door stroom geen eenheid!

De uitgangsgeleiding h22
Deze parameter geeft de verhouding tussen de uitgangsstroom i_2 en de uitgangsspanning u_2 bij constante ingangsstroom, dus met i_1 gelijk aan nul.
In formule:
$h22 = i_2 / u_2 \; (i_1 = 0)$
De uitgangsgeleiding heeft als eenheid de S (Siemens) en is niets andere dan een inverse weerstand.

De spanningsterugwerking h12
Deze parameter wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de ingangsspanning u_1 en de uitgangsspanning u_2 en dit bij constante ingangsstroom, dus met i_1 gelijk aan nul.
In formule:
$h12 = u_1 / u_2 \; (i_1 = 0)$
De spanningsterugwerking beschrijft de interne fysische terugkoppeling tussen de uitgang van de transistortrap en de ingang.

Het vierpool-schema van een transistortrap

Van zwart doosje naar vierpool-schema
Aan de hand van de hybride-parameters van een transistortrap kunt u het '*zwarte doosje*' uit de vorige figuur vervangen door het schema van de onderstaan de figuur. In dit schema wordt de trap voorgesteld door zijn hybride-parameters en door de in- en uitgangsspanningen en -stromen.
De ingangsketen is opgebouwd uit de serieschakeling van de ingangsweerstand h11 en een wisselspanningsbron waarin de spanningsterugwerking h12 een rol speelt. Op deze manier slaagt men er in de fysische terugkoppeling van de transistor in het schema op te nemen.
De uitgangskring bestaat uit een parallelschakeling van een stroombron, waarin uiteraard de stroomversterking h21 een rol speelt en een weerstand, waarin de uitgangsgeleiding h22 is opgenomen.
Het vierpool-schema wordt gestuurd met een stroom Δi_b, die over de serieschakeling van de ingangskring de spanning Δu_{be} genereert. In de uitgang vloeit een stroom Δi_c, die over de parallelkring van de uitgang een spanning Δu_{ce} genereert.



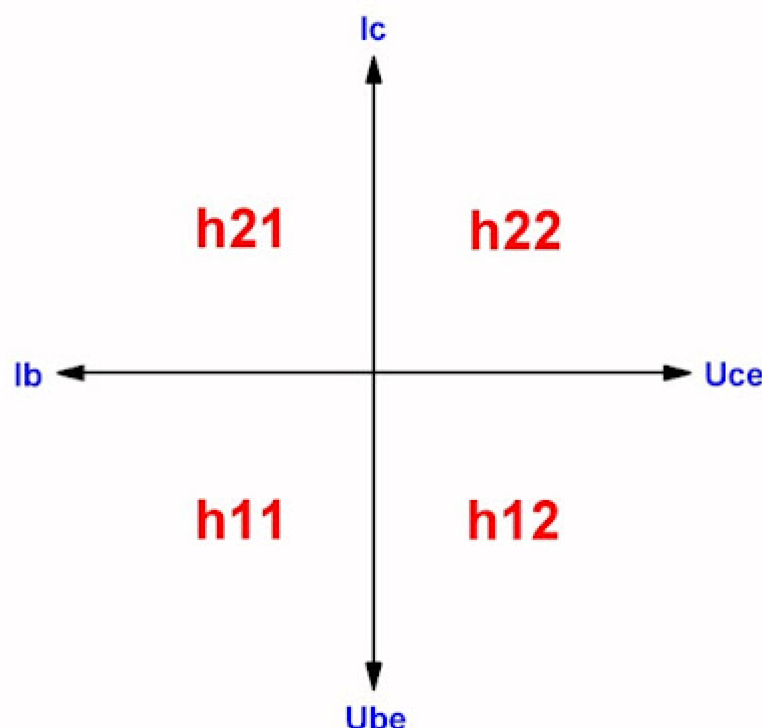
De universele transistor vergelijkingen
Aan de hand van het vierpool-schema kunt u twee wiskundige formules opstellen die het gedrag van de transistor volledig definiëren. Dit noemt men de '*universele transistor vergelijkingen*'. Het is dankzij dergelijke formules dat programma's zoals '*Spice*' een schakeling kunnen doorrekenen.
De twee vergelijkingen luiden:
$\Delta u_{be} = (h11 \cdot \Delta i_b) + (h12 \cdot \Delta u_{ce})$
en
$\Delta i_c = (h21 \cdot \Delta i_b) + (h22 \cdot \Delta u_{ce})$
Als u deze twee formules even laat doordringen en vervolgens vergelijkt met het vierpool-schema, zult u vaststellen dat de formules eenvoudig te begrijpen zijn.

Bepalen van de hybride-parameters uit de grafieken

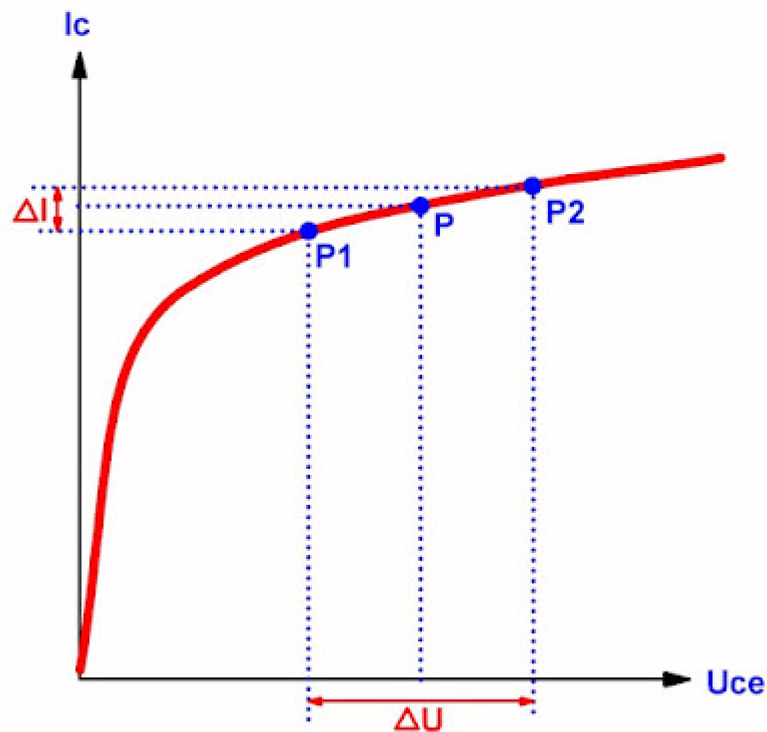
Transistor grafieken
Het gedrag van een transistor wordt vaak in vier grafieken weergegeven. Iedere grafiek geeft het verband weer tussen twee van de vier besproken grootheden. Dit noemt men de '*karakteristieken van de bipolaire transistor*'.
De vier karakteristieken geven:

- Het verband tussen I_c en U_{ce} (kwadrant 1)
- Het verband tussen I_c en I_b (kwadrant 2)
- Het verband tussen U_{be} en I_b (kwadrant 3)
- Het verband tussen U_{be} en U_{ce} (kwadrant 4)

De vier karakteristieken hebben dus assen gemeen. Vandaar dat u de karakteristieken niet afzonderlijke moet tekenen. U kunt de vier grafieken samenvatten in het assenstelsel van de onderstaande figuur. In de figuur staat aangegeven welke assen gebruikt worden voor het definiëren van welke grootheden. Dit is een standaard indeling, die door iedere transistorfabrikant wordt gevolgd.
Het zal duidelijk zijn dat die vier kwadranten de vier besproken hybride-parameters van de transistor beschrijven. Deze zijn in de vier kwadranten in het rood ingevuld.



Bepalen van de hybride-parameters uit de grafieken
Uit de grafieken van een transistor kunt u op een eenvoudige manier de vier hybride-parameters berekenen. Dat gaat met een methode die de '*raaklijn-techniek*' wordt genoemd. In de onderstaande figuur hebben wij dit uitgewerkt voor het eerste kwadrant, waaruit u de hybride-parameter h22 kunt afleiden.
U zet in het midden van het lineaire deel van de grafiek een punt P. Vervolgens laat u de spanning U_{ce} die met dit punt overeen komt met een kleine waarde stijgen en dalen. Voor beide nieuwe punten P1 en P2 bepaalt u de overeenkomstige stromen. U berekent nu de verschillen tussen de grootste en kleinste spanning en stroom. Deze Δ-waarden kunt u in de definitie van de h22-parameter invullen:
h22 = Δi / Δu



Berekenen van de h22 parameter uit de grafiek.
(© 2023 Jos Verstraten)